

مروری بر سازه‌های تنسگریتی (کش بستنی) با تأکید بر کاربرد آن در معماری

دکتر هاشم هاشم نژاد^۱، مهندس سارا سلیمانی^۲

^۱ دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
^۲ عضو هیأت علمی دانشگاه کردستان و دانشجوی دکتری معماری دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
(تاریخ دریافت مقاله: ۸۸/۶/۷، تاریخ پذیرش نهایی: ۸۸/۹/۲۱)

چکیده:

در حدود پنج دهه پیش، سازه‌های تنسگریتی به عنوان یکی از انواع سازه‌های فضاکار مطرح گردیدند. این سازه‌ها به دلیل دارا بودن مزایای بیشماری چون سبکی، زیبایی، کارایی، قابلیت باز و بسته شدن و تطبیق پذیری با نیروهای ایجاد شده در سازه در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از معماران، مهندسين، رياضيدانان و متخصصين بسيارى از علوم ديگر را به خود جلب نمودند. کاربرد این سیستم در مجسمه‌سازی و در طراحی صنعتی و ساخت اشیاء کاربردی و تزئینی، اندیشه استفاده از آن را در معماری مطرح نمود. اما به علت پیچیدگی نسبی و البته عدم آشنایی معماران با این نوع سازه در ایران علاوه بر اینکه نمونه قابل توجه ساخته شده‌ای از سازه تنسگریتی وجود ندارد، منابع بسیار محدود و مختصری نیز در ارتباط با آن در اختیار می‌باشد. بسیاری از معماران و مهندسين، سازه تنسگریتی را نمی‌شناسند و نهایتاً فقط در حد اسم با آن آشنایی دارند. از این جهت این مقاله به منظور آشنایی بیشتر معماران و مهندسين سازه با این نوع سازه و با هدف گام نهادن به سوی بکارگیری عملی آن در معماری و مهندسی سازه به معرفی سازه‌های تنسگریتی، ویژگی‌ها و کاربرد عملی آن در عرصه معماری امروز جهان پرداخته است.

واژه‌های کلیدی:

سازه، فضاکار، تنسگریتی، کشش، فشار.

مقدمه

تلاش های بسیاری از متخصصین به ابداع سیستم های گوناگون سازه های فضاکار منجر گردید. این دستاوردها، دریچه های جدیدی را به روی معماران و مهندسان برای طراحی فرم های بدیع و نو باز کرد و اجرای ساختمان هایی با ابعاد گوناگون را با پایدارترین و اقتصادی ترین روش ها امکان پذیر ساخت.

در این بین سازه های تنسگریتی^۲ نیز به عنوان یکی از انواع سازه های فضاکار مطرح گردیده و محبوبیت فراوان یافتند.

سازه های فضاکار^۱ از اوایل قرن بیستم به عنوان گروهی از سازه ها که از نقطه نظر سبکی، مقاومت، تطبیق پذیری و نیز سرعت اجرا پاسخ مناسبی برای تخیلات معمارانه تلقی می گردیدند، در عرصه ساخت و ساز وارد گردیدند. رفتار سه بعدی این سازه ها، پیش ساختگی و امکان تولید انبوه باعث گردید که سازه های فضاکار به عنوان یکی از مؤثرترین روش ها برای پوشش سقف ها و اجرای ساختمان ها مورد توجه معماران و مهندسان قرار گیرند.

تاریخچه ظهور مفهوم تنسگریتی

محسمه سازی، نخستین جایگاه ظهور مفهوم تنسگریتی

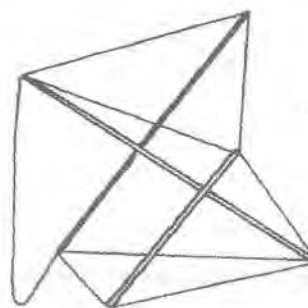
اولین نمونه از آنچه که سازه تنسگریتی نامیده می شود، توسط هنرمند کانستراکتیویست روسی Karl loganson ساخته و در نمایشگاه Obmokhu در ۱۹۲۱ به نمایش درآمد. او می گوید: "از نقاشی تا مجسمه سازی، از مجسمه سازی تا ساخت و از ساخت تا تکنولوژی و نوآوری- این مسیر انتخابی من است و مطمئناً مسیر انتخابی هر هنرمند انقلابی خواهد بود." او در اثرش سه تکیه گاه را در تعادل قرار داده است، میله های تحت فشار به کمک ریسمان پیوسته تحت کشش که از سوراخ میله ها از رأس تا رأس کشیده شده است در تعادل قرار گرفته اند (تصویر ۲). با استناد به تعریف، این سازه نمی تواند یک سازه تنسگریتی واقعی باشد چرا که کشیدن نخها می تواند موقعیت میله ها را تغییر دهد، اما شباهت نزدیکی به سازه تنسگریتی دارد.

متأسفانه این ایده در روسیه ادامه داده نشد، از این جهت ابداع سازه های تنسگریتی را به اسنلسون^۳ در ۱۹۴۸ نسبت می دهند. او با طراحی اولین فرم های مجسمه گونه به صورت ترکیبی از اعضاء فشاری غیرممتد و کابل های کششی پیوسته، عنوان ابداع کننده این سازه را بخود اختصاص داده است. اسنلسون تعدادی سازه تنسگریتی با تنوع شکلی فراوان ساخت و در نمایشگاه های هنری به نمایش درآورد. تعدادی از این مدل ها به کمک میله های X شکل طراحی گردیدند. این مقاطع X شکل از قطعات چوبی ساخته شده اند که رؤس آنها با کابل به یکدیگر اتصال یافته است. دو واحد X شکل در یکدیگر در یک مسیر سه بعدی قرار داده شده و نهایتاً به یک صفحه چوبی اتصال یافته اند (تصویر ۳). مطابق با توصیفات اسنلسون، با این روش مدل تنسگریتی ای بدست می آید که شامل دو میله و چهار کابل است. اگرچه که کابل ها در انتهای میله ها، به آنها اتصال یافته اند، اما در واقع پیوسته هستند. بعدها اسنلسون

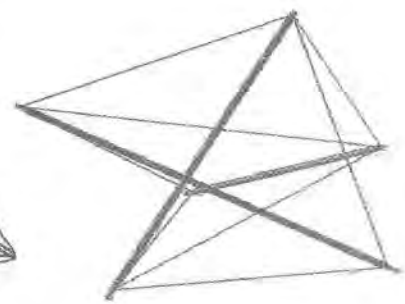
تعریف مفهوم تنسگریتی

کلمه تنسگریتی از ادغام دو کلمه Integrity و Tensional تشکیل شده است، سازه های تنسگریتی سازه های سه بعدی پایداری هستند که ساختارشان از طریق تعادل پیچیده ای از نیروها در بین عناصر فشاری منقطع و عناصر کششی ممتد فراهم می گردد (Robin, 1996, 26).

به بیان دیگر سیستم های تنسگریتی شبکه های خود پایدار^۴ با اتصالات لولایی هستند که از ساختار به هم پیوسته ای از کابل ها در کنار ساختار ناپیوسته ای از میله ها تشکیل یافته اند (Tibert, 2002, 24). از نظر تئوری میله ها اجزا مستقیم الخطی هستند که جهت تحمل فشار طراحی شده اند و کابل ها اعضا مستقیم الخطی هستند که در حالت عادی حداکثر طولشان را دارند اما می توانند به طور آزادانه تغییر طول یافته و کوتاه تر گردند، بنابراین نمی توانند فشار را تحمل کنند مگر آنکه پیش تنیده شوند (Bing, 2004, 10) (تصویر ۱).



تصویر ۲- اثر loganson
ماخذ: (Tibert, 2002)



تصویر ۱- مفهوم تنسگریتی.
ماخذ: (Robin, 1996)

سازه‌های تنسگریتی بطور مستقل از این دو، توسط امریخ^۶ در دهه ۶۰ نیز معرفی شدند. او یک روش سیستماتیک را جهت استخراج فرم‌های تنسگریتی از محدوده‌ای از چندضلعی‌های افلاطونی و ارشمیدسی بدست آورد.

شکل‌شناسی سازه‌های تنسگریتی

فولر باور داشت که تنسگریتی قانون طبیعت است، او باور داشت که سازه‌های تنسگریتی بطور طبیعی فرم‌های سازه‌ای بهینه‌ای هستند، بدون آنکه آنها را آزموده باشد. باور او تأثیر مهمی بر پیرامونش برجای گذاشت. مطالعات شکل‌شناسی نهایتاً تأثیر مفهوم تنسگریتی بر معماری را نشان داد.

مدول تنسگریتی^۷

مدول تنسگریتی به منشور تنسگریتی^۸ مثلثی بر می‌گردد. یک حجم خود پایدار که از تعادل بین میله‌های مجزا و کابل‌های پیوسته شکل گرفته است. در آن میله‌های مایل، رئوس مخالف هم را جهت شکل‌گیری منشور به هم وصل کرده‌اند. شرایط تعادل برای هر اتصال یکسان است. میله‌ها در حجم سه بعدی توسط سه گروه کابل بسته شده و به تعادل رسیده‌اند (Bing, 2004, 185) (تصویر ۷).

در بلوک‌های سازه‌ای مدول‌های تنسگریتی می‌توانند با طرح‌بندی‌های متنوعی مورد استفاده قرار گیرند. در یک

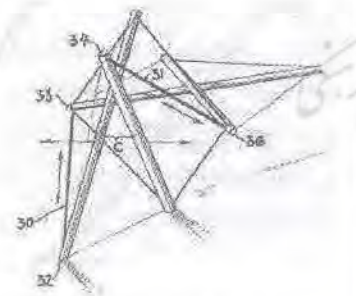
تلاشش را جهت جداکردن اعضا فشاری در نقاطی که یکدیگر را قطع می‌کنند، ادامه داد.

مشهورترین کار اسنلسون Needle Tower می‌باشد (تصویر ۴)، که با ارتفاع ۹۰ فوت در فضا مجسمه وار بصورت نامنظمی پیش رفته است. این کار در ۱۹۶۸ در واشنگتن به نمایش درآمد. جالب توجه است که در آن زمان مجسمه ساز باور نداشت که سازه او در نقش تحمل‌کننده بار نیز، موفق بوده است.

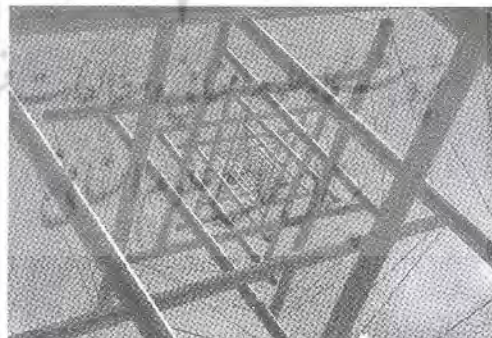
در اولین نمونه ثبت شده توسط اسنلسون، واحد تنسگریتی، یک شکل بادبادک مانند بصورت لوزی ساده می‌باشد. دو میله در وسط همدیگر را قطع کرده و تارهای کششی پیرامون آن چهار انتهای میله‌ها امتداد یافته‌اند. مقاومت آنها در حالت افقی بسیار زیاد است، اما در فضای سه بعدی ناپایدار هستند (وقتیکه بر لبه‌ها قرار می‌گیرند) که البته با قرار دادن دو نمونه از این واحدها در کنار یکدیگر می‌توان شرایط پایداری را فراهم ساخت (تصویر ۵).

ورود مفهوم تنسگریتی به حوزه مهندسی و معماری

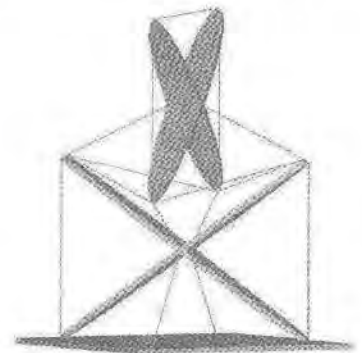
اگرچه که آغازگر و پدیدآورنده این سازه اسنلسون است، اما برای اولین بار فولر^۹ بود که از دریچه معماری به آن نگریست. فولر سریعاً پتانسیل‌های ایده اسنلسون را شناسایی، نامگذاری و اصلاح کرد و سرانجام در ۱۹۶۲ به ثبت رسانید. فولر در اختراعش نشان داد که چگونه می‌توان مفهوم تنسگریتی را برای ساخت یک گنبد تک لایه بکار گرفت (تصویر ۶). مدل فولر از سه میله فشاری و کابل کششی تشکیل شده بود به گونه‌ای که کابل‌ها در انتهای میله‌ها قطع نشده و بصورت پیوسته‌ای ادامه یافته بودند.



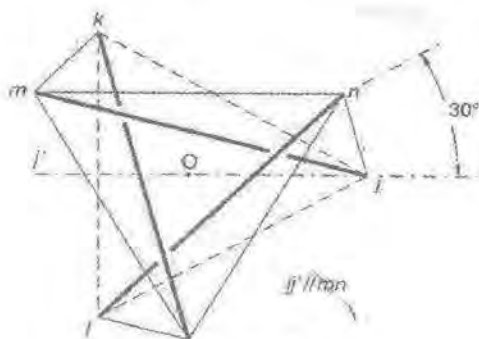
تصویر ۵- اولین نمونه ثبت شده.
ماخذ: (Robin, 1996)



تصویر ۴- Needle Tower.
ماخذ: (Robin, 1996)



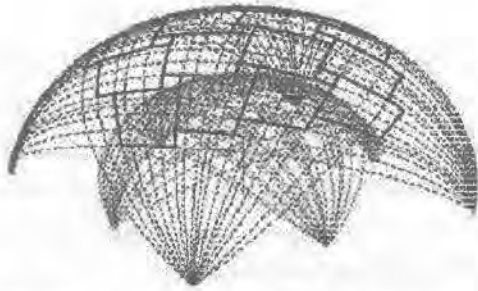
تصویر ۳- مدل X شکل.
ماخذ: (Tibert, 2002)



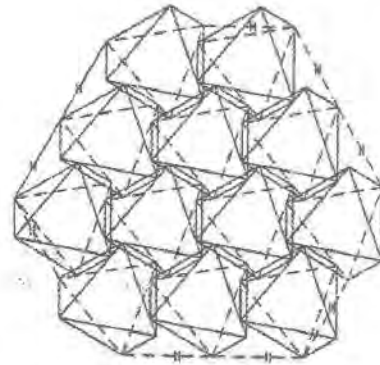
تصویر ۷- مدول تنسگریتی.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۶- گنبد ساخته شده توسط فولر.
ماخذ: (http://www.bfi.org/images/content/coming_soon/15_tensegrity.png)



تصویر ۹- فرمهای منحنی دو لایه با پایه مربعی.
ماخذ: (Marshall, 2003)



تصویر ۸- اشکال با میله های منفصل.
ماخذ: (Bing, 2004)

اتصال میله های فشاری به یکدیگر منجر به سادگی هندسی و پیوستگی کابل ها گردیده است.

فرم های گنبدی دو لایه با پایه مثلثی: Hanaor بر بررسی و مطالعه فرم های گنبدی تأکید داشت و آزمایشاتش را در ارتباط با یک ساختار گنبدی که خود پیشنهاد کرده بود، انجام داد. او در هندسه سازه های تنسگریتی دو لایه، یک ساختار گنبدی با واحدهای مثلثی را بکار گرفت و استحکام واحدهای مثلثی را مورد بررسی قرار داد.

فرم های منحنی دو لایه با پایه مربعی: بر اساس اتصالاتی که Hanaor پیشنهاد کرده بود، Liapi آرایش منحنی واری از واحدهای تنسگریتی منشوری با پایه مربعی را بجای واحدهای مثلثی Hanaor، مورد بررسی قرار داد. او امکان ایجاد انحنا در دو محور عمود بر هم را نشان داد (MARSHALL, 2003, 28) (تصویر ۹).

مدل سازی و تعیین مشخصات هندسی سازه های تنسگریتی

پیچیدگی مفهومی و هندسی و ناتوانی در ارائه مدل های ریاضی برای تحلیل رفتار سازه های تنسگریتی از جمله فاکتورهای مهمی هستند که روند پیشرفت این سازه را کند ساخته و تحت تأثیر قرار داده است. از موارد دیگری که به عنوان عامل بازدارنده توسعه به آن اشاره شده است، فقدان استانداردهای ساخت و ساز برای این نوع از سازه هاست. تربیت طراحان، کارگران ساختمانی، بیمه، خطرپذیری اقتصادی و... از جمله دیگر عوامل تأثیرگذار هستند (Corgan, 2002).

اما همچنان مهم ترین عامل، عدم توانایی طراحان در تجسم ذهنی این سازه ها بواسطه پیچیدگی ساختاریشان، شناخته شده است. در ادامه به روش های متداولی که برای مدل سازی و تعیین مشخصات هندسی سازه های تنسگریتی بکار می رود، اشاره می گردد.

مدل سازی سازه های تنسگریتی

برای سیستمی که هم از نظر هندسی و هم از نظر مفهومی پیچیده است، یک روش سیستماتیک برای یافتن فرم ضروری است. جبر فرمین توسط هوشیار نوشین ارائه شده و می تواند جهت تعریف یک فرم پیچیده بکار رود، هم چنین برنامه نرم افزاری فرمین برای این

تقسیم بندی اشکال نشأت گرفته از مدول های تنسگریتی در دو گروه دسته بندی می گردند.

O اشکال با میله های منفصل (اتصال میله به میله وجود ندارد)؛ در اینجا مدول ها مستقیماً در رئوس به یکدیگر اتصال دارند. هر کابلی به دو قسمت تقسیم می شود ضمن آنکه میله ها در تماس با یکدیگر نیستند. این اشکال، اشکال هندسی خالص تلقی می گردند. بنابراین حتی شبکه هایی که از طریق اتصال منشورهای از نظر هندسی صلب تشکیل یافته اند، همچنان انعطاف پذیر هستند (تصویر ۸).

O اشکال با میله های پیوسته؛ روش دیگری که توسط مترو^۱ پیشنهاد شده است، اتصال گره به گره می باشد. در این حالت میله ها در انتها به یکدیگر اتصال یافته اند. این فرم ها مفهوم جزیره های از فشار در دریایی از کشش را نقض می کنند. اما با این وجود در دسته سیستم های تنسگریتی قرار می گیرند و از طریق مفهوم گسترش یافته فرض اولیه، شکل گرفته اند. دو روش برای شکل گیری اشکال با میله های پیوسته وجود دارد. یکی اتصال رأس به رأس است. در این حالت مدول ها در هر دو لایه تنها از طریق رئوس به یکدیگر اتصال یافته اند. روش دیگر اتصال رأس به لبه می باشد (Bing, 2004, 194).

O اشکال تک لایه؛ Vilanay یک سیستم تنسگریتی تک لایه را ابداع کرد که در آن میله ها به جای آنکه بصورت عمودی آویزان شوند، در محیط و پیرامون یک شکل کرووی استقرار یافته اند. این نمونه بصورت یک طرح مطالعاتی باقی ماند و مقیاس واقعی پیدا نکرد. در گنبد فولر دهانه ها افزایش و انحناء کاهش یافته و میله ها نیز به یکدیگر اتصال یافته اند، اما Vilanay از این ایده دوری جست، از این جهت به خاطر اضافه طول لوله ها قیمت شدیداً بالا رفت (Hanaor, 1997).

O اشکال دو لایه؛ به کمک واحدهای منشوری تعریف شده اند. آغاز این مفهوم از ایده اشکال تک لایه Vilanay آغاز گردید. ساده ترین شکل آن از سه میله فشاری و ۹ کابل کششی تشکیل یافته است. با هندسه منقطع در میله ها، ممان های خمشی در آنها به حداقل می رسد (Irving et. Al, 2001, 84) (تصویر ۱).

O شکل دو لایه با پایه مربعی؛ مترو یک روش متفاوت را برای طراحی سازه های تنسگریتی از طریق مورد توجه قرار دادن اتصالات، ارائه کرده است. وی یک سری منشورهای تنسگریتی ایجاد کرده که در یک آرایش گره به گره اتصال یافته اند (Kahala, 2000). در این حالت میله ها مستقل از یکدیگر نبوده و ساختار آنها ساده تر شده است.

می‌کند، بهره‌جسته است (Kin & Liapi, 2004, 28).

لازم بذکر است تاکنون هیچگونه متدولوژی مشخصی که بتواند ثبت گردد، تکرار شود و منتهی به شکل سازه نهایی گردد، ثبت نشده است و هنوز نیاز بوجود روشی جهت قانون مند کردن این هندسه و استانداردی جهت خواسته‌ها و اولویت‌هایی که توسط طراح مطرح می‌گردد، احساس می‌شود (Bing, 2003, 85).

مزایای سازه‌های تنسگریتی

همانطور که ذکر شد سازه‌های تنسگریتی دارای فواید متعددی هستند که از جمله آنها می‌توان به موارد زیر اشاره داشت:

- قابلیت باز و بسته شدن؛ سازه‌های صلب قابلیت جابجایی و تغییر کمی دارند، این در حالی است که در سازه‌های تنسگریتی با توجه به اینکه عناصر فشاری بصورت غیرممتد می‌باشند، جابجایی و تغییر مکان در این نوع سازه‌ها با حداقل عناصر سازه‌ای امکان‌پذیر می‌باشد، این امر در ساخت دکل‌های مخابراتی و تجهیزات مورد نیاز فضانوردان در فضا تأثیر فراوانی دارد (Furuya, 1992).
- سازه‌های سبکی هستند که نسبت مقاومت به وزنشان بالاست.
- با حداقل مصالح ساخته می‌شوند.
- تمامی اعضا فقط تحت بارگذاری محوری قرار دارند که منجر به سبکی و استحکام آنها می‌گردد.
- می‌توانند به صورت یک سیستم مدولار عمل کنند.
- بقای سیستم؛ عملکرد سازه‌ای المان‌های موجود در سیستم‌های تنسگریتی و چگونگی انتقال بار در آنها به نحوی است که در صورت عملکرد نامناسب یک المان انتقال نیرو به سادگی از طریق سایر اعضا صورت گرفته و از این طریق سازه پایدار باقی مانده و خاصیت خود را حفظ می‌نماید (Sultan, 2004).
- مقیاس‌پذیری؛ وجود مدول پایه در هندسه سازه‌های تنسگریتی امکان ساخت آن‌را در ابعاد گوناگون با کارکرد سازه‌ای مناسب فراهم می‌سازد (Hernandez Juan, Mirats Tur, 2008, 27).
- ساخت آن ساده بوده و خطر کمی در موقع حادثه ایجاد می‌کنند.
- فرم‌های زیبایی ایجاد می‌کنند که می‌توانند نظر بیننده را بخود جلب کنند.

ظهور مفهوم تنسگریتی در معماری

مهندس لهستانی، زالوسکی^{۱۱} اولین گنبد تنسگریتی را در یک استادیوم ورزشی ۱۲۰۰۰ نفره در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۶۲ در Katowice اجرا کرد. او این گنبد را قبل از آنکه فولر حق

سیستم در مرکز تحقیقات سازمان مهندسی سیویل در دانشگاه ساری در گیل‌فورد انگلستان طراحی گردیده است^{۱۲}.

قرمین ممکن است برای کسب اطلاعات مربوط به اعضای یک سیستم سازه‌ای از جمله مختصات گره‌ها، بارگذاری‌های ویژه، تعداد اتصالات و ... نیز بکار رود، به علاوه اطلاعات بدست آمده برای تصور بصری سیستم سازه‌ای یا حتی به عنوان اطلاعات ورودی جهت انجام تحلیل، می‌تواند بکار رود (Nooshin, 1991, 1202). با اینحال روش قرمین برای نمونه‌های سازه‌های تنسگریتی دولایه‌ای که توسط Liapi و Hanaor ارائه شده‌اند، قابل استفاده نمی‌باشد.

تعیین مشخصات هندسی سازه‌های تنسگریتی

موضوع یافتن فرم یا تعیین شکل هندسی یک سازه تنسگریتی پایدار توجه زیادی را بخود جلب کرده است. دو موضوع قابل بررسی وجود دارد:

- تعیین چگونگی اتصال اعضا فشاری و کششی برای تشکیل یک سازه پایدار؛
- تعیین طول اعضا کششی و فشاری برای تشکیل یک سازه پایدار.

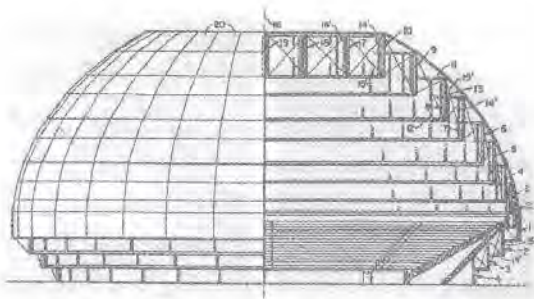
یافتن فرم پایدار برای این نوع سازه‌ها بسیار پیچیده است، در سازه‌های اولیه‌ای که توسط فولر و استلسون ارائه شد، از چندوجهی‌های محدب به عنوان مدول اولیه در تشکیل فرم استفاده شد که بعدها این روش به اشکال متنوعی منجر گردید که در کارهای Pugh خلاصه شد. به هر حال تمام اینها براساس هندسه‌های منظمی شکل گرفته‌اند.

متدولوژی مشخص و واضحی برای یافتن فرم پایدار گنبد‌های تنسگریتی تک‌لایه ارائه نگردیده است، اما در ساختاری که بیشتر عناصر آن یکسان هستند، فرم می‌تواند به کمک یک روش پارامتریک تعریف گردد.

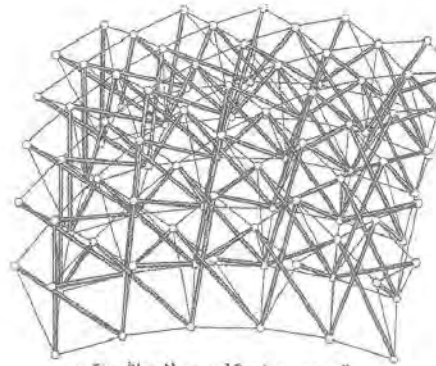
تعریف سازه‌های تنسگریتی دولایه به روش هندسی امکان پذیر می‌باشد، چراکه تمام ارتباطات بین عناصر به کمک قوانین هندسی تعریف شده‌اند. سیستم‌های تنسگریتی که براساس یک واحد ساده شکل گرفته‌اند، طرح‌های پارامتریک هستند. با این وجود هیچکدام از راه‌حلی‌هایی که در صنعت و محیط آکادمیک وجود ندارند، چوایگوری هندسه سازه‌های تنسگریتی دولایه و پارامترهای مرتبط با آن نیستند.

Liapi روشی را برای واحدهای تنسگریتی دولایه با پایه مربع جهت ایجاد گنبد کروی ساده عرضه کرده است. او براساس مشاهداتش یک روش هندسی را برای تعریف ساختار فضایی سازه‌های تنسگریتی کروی پیشنهاد کرده است (۲۰۰۱).

روشی برای تولید شبکه‌های تنسگریتی کروی با استفاده از نرم افزار اتوکد به کمک هندسه توصیفی ارائه شده است. این روش تمامی پارامترهای شبکه‌های تنسگریتی کروی را از قبیل تناسب واحدها، هم‌پوشانی واحدها و ... را در برمی‌گیرد و از مسیر گرافیکی گام به گامی که از روش‌های هندسی تبعیت



تصویر ۱۱- گنبد Aspension اثر فولر.
ماخذ: (Robin, 1996)



تصویر ۱۰- گنبد دولایه اثر مترو.
ماخذ: (Bing, 2004)

ژاپنی قابلیت تابش را دارد و نهایتاً می‌تواند گسترش یابد. فولر در توضیح ابداعش بیان می‌دارد که این اختراع وابسته به ذهن اوست و مردمی که این سازه‌ها را می‌بینند آنها را همانند مجسمه‌های اسنلسون به خاطر خواهند آورد.

برخی ادعا دارند که این اثر فولر به دو دلیل شکست خورده است. اول اینکه سیستم بسته ندارد و نهایتاً میله‌ها به یک حلقه فشاری در پیرامون می‌رسند و دیگر اینکه میله‌های عمودی به حلقه‌های نسبتاً محکمی اتصال یافته‌اند و ساختار یک سازه تیر و ستون را تداعی می‌کنند. اما برخی دیگر اعتقاد دارند که می‌توان بصورت منصفانه‌ای این گنبد را جزء سازه‌های تنسگریتی بحساب آورد و حتی آن را اولین کاربرد معمارانه این نوع سازه تلقی کرد. حتی می‌توان این گنبدها را بدون حلقه فشاری پیرامونی ساخت بطوریکه شبیه تر به سازه‌های تنسگریتی گردند، فولر نتوانست صورت واقعی ایده‌اش را ببیند و بکام مرگ رفت.

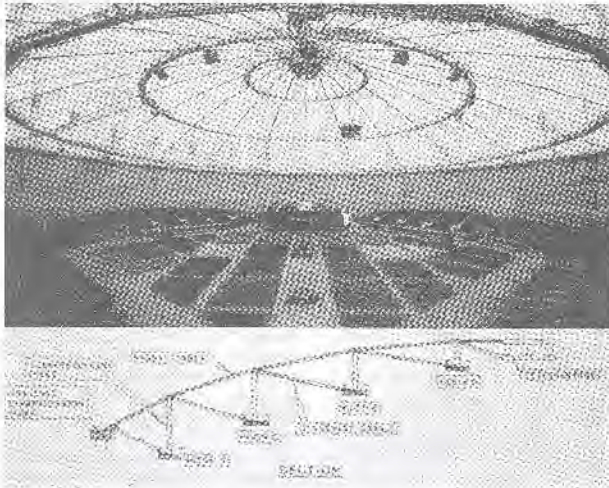
گایگر نیز چهار نوع از این گنبدهای تنسگریتی را در زمان کمی پیش از مرگش ساخت (تصویر ۱۲). برای او تنسگریتی راهی برای برپا ساختن سقف‌های پارچه‌ای بدون استفاده از سازه‌های پادی گران قیمت و بدون خطرات ناشی از تخریب آنها بحساب می‌آید.

گایگر با همراهی معمارانی چون Kum-Hee و Kim swoo-Guen ساخت دو گنبد کوچک در سئول را تجربه کرد. او یک زمین ژیمناستیک با قطر ۳۹۳ فوت و یک استادیوم شمشیربازی با قطر ۲۹۵ فوت را طراحی کرد. در زیر سقف یک لایه عایق بندی به ضخامت ۸ اینچ، یک آستر آکوستیک و یک مانع تولید بخار قرار داد. گایگر دریافت که در حدود ۲۵ تن از تجهیزات، شامل نورپردازی و دوربین‌ها می‌بایستی از نقاط منفردی از سازه آویزان گردند، از این رو می‌بایستی دوباره اطمینان می‌یافت که گنبدها می‌توانند بارهای نامتعادلی چون بار برف را تحمل کنند. گایگر بار برف را ۲۵ پوند بر فوت مربع در نظر گرفت و سازه را به گونه‌ای طراحی کرد که می‌توانست در حدود ۸۰۰ تن یعنی بیش از ۱۰ برابر وزن خودش را تحمل کند. گنبدهای گایگر مثل آنچه که فولر پیشنهاد داده بود شامل سطوح سه بخشی (مثلث بندی) نیستند.^{۱۵} کابل‌ها و میله‌ها، خرپاهای مسطح عمودی‌ای را شکل داده‌اند که بر حلقه‌های بالارونده واقع گردیده‌اند. گایگر می‌گوید که من دریافت‌ام که مثلث بندی یک التزام در سازه‌های کابلی نیست، مثلث بندی اعضا اضافه‌ای را به سازه می‌افزاید که ضروری نیست و مشکلاتی را

امتیاز گنبد Aspension را بگیرد و ۲۶ سال قبل از اینکه گایگر^{۱۴}، اولین گنبد تنسگریتی خود را بسازد، ساخت، سقف Katowice 400 فوت دهانه دارد و از اولین تلاش گایگر نیز بزرگ تر است. او یک سیستم ۱۲ حلقه‌ای را به همراه میله‌هایی به ارتفاع سه متر ایجاد کرده است که سقف فلزی و گنبد مرکزی را حفظ می‌کنند.

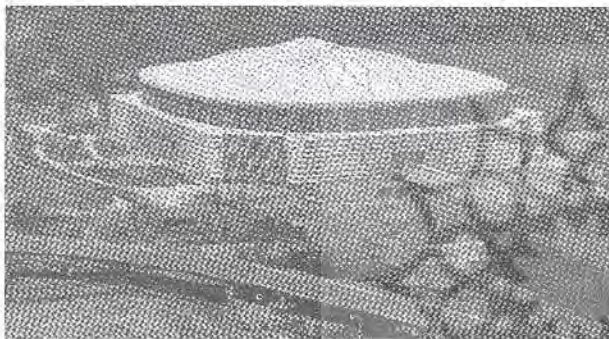
در یک مثال دیگر از یک سیستم تنسگریتی ناخالص^{۱۳}، مترو رئیس آزمایشگاه مهندسی سیویل دانشگاه مانتلیر^{۱۴}، جهت ایجاد یک گنبد دولایه، اعضا فشاری را بهم متصل ساخت (تصویر ۱۰). همانند شبکه تنسگریتی دو لایه امریخ، سطح بالایی و پایینی کاملاً از کابل تشکیل یافته و میله‌های فشاری در اقطار این شبکه کابلی قرار گرفته‌اند، نوآوری کار مترو در اتصال میله‌ها به همدیگر در قسمت انتهایی‌اشان می‌باشد. در صفحه پایینی به هر گره چهار میله و در صفحه بالایی به هر گره دو میله وارد می‌شود. کابل‌ها در بالا و پایین شبکه‌های مربعی را ایجاد کرده‌اند، شبکه بالایی در هماهنگی با شبکه پایینی کمی چرخش دارد، شبکه کابل‌های بالا و پایین همچنان از کابل‌های ممتد تشکیل یافته‌اند. ویژگی شاخص گنبد مترو این است که شلوعی نمونه کارهای Hanaor, Emmerich, Vilnay را تخفیف داده است. این مدل نسبت به انواع قبلی آن ساده‌تر است، چراکه اعضا بصورت غیرقابل پیش بینی نچرخیده و گسترش نیافته‌اند، از این جهت قابل توجه می‌باشد.

در ۱۹۶۴ فولر سیستم گنبد Aspension خود را ثبت کرد (تصویر ۱۱). دلیل نامگذاری او سازه معلق بالارونده آن می‌باشد که در آن حلقه‌های داخلی از میله‌هایی که بر حلقه‌های بیرونی قرار دارند، آویزان شده‌اند. بیرونی ترین حلقه که از کابل‌های کششی آویزان است به بالای دیوارهای پایینی سازه اتصال یافته است. در هر حلقه میله‌ها بصورت عمودی قرار گرفته‌اند، از این میله‌ها کابل‌هایی آویزان شده که حلقه کوچک تر داخلی را نگه می‌دارند. فولر در مورد پوشش این سازه سکوت کرده است، اما واضح است که سقف می‌تواند بصورت یک پوسته سبک ضدآب اجرا گردد. سقف توسط تعدادی میله نگه داشته می‌شود، هیچکدام از این میله‌ها به زمین نمی‌رسند. فولر در توضیح این گنبد در کتابش می‌نویسد: "من در دنیای تنسگریتی متوجه شدم که ساخت آنچه را که من گنبد Aspension نامیده‌ام، آسان است. این گنبد می‌تواند بصورت تدریجی از سمت بیشترین قطر در زمین سوار شده و به بالا انتقال یابد. این سازه حالت آکاردئونی دارد و مثل چراغ دریایی



تصویر ۱۳ - گنبد SunCoast

ماخذ: (<http://www.columbia.edu/cu/gsappl/>)
(BT/DOMES/TIMELN/suncoast/sun-06.jpg)

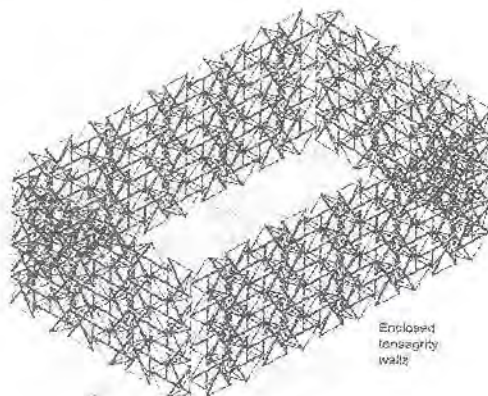


تصویر ۱۴ - گنبد جورجیا

ماخذ: (<http://glassteelandstone.com/images/>)
(US/GA/ATL/GeorgiaDome-001.jpg)

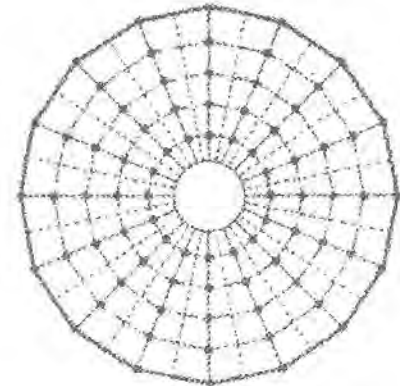
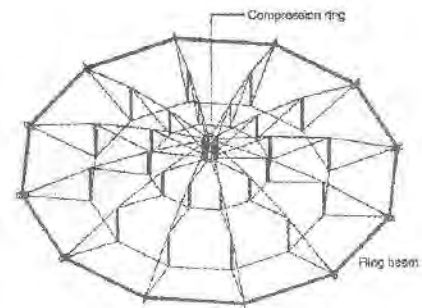
آن از دو دایره‌ای که توسط مقطع پروانه‌ای شکل بهم اتصال یافته‌اند، تشکیل شده است. آویزان ساختن حلقه اول در زیر حلقه فشاری مزاحم دید تماشاچیان در ردیف‌های بالا بود، از طرف دیگر اگر به اندازه کمی حلقه بالا برده می‌شد، کشش در کابل‌ها نیز بالا می‌رفت، محاسبات نشان داد که زاویه ۴۵ درجه، بهینه می‌باشد، اما حلقه‌های بعدی می‌توانند زاویه کمتری داشته باشند چراکه بار کمتری را تحمل می‌کنند.

در ادامه تکنیک تقریبی برای طراحی گره‌های تنسگریتی با ساختار قطری، فصل جدیدی را در سازه‌های تنسگریتی آغاز کرد.



تصویر ۱۵ - دیوار شیشه‌ای

ماخذ: (Bing, 2004)

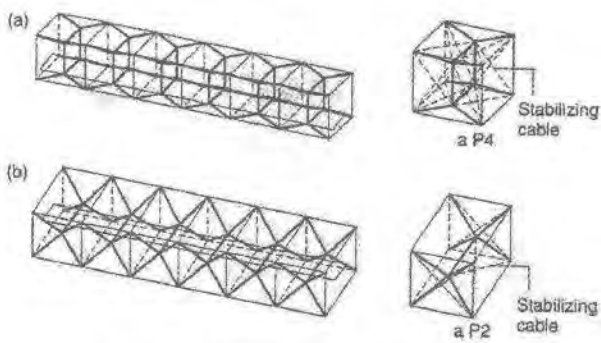
تصویر ۱۲ - گنبد تنسگریتی اثر گایگر.
ماخذ: (Robin, 1996)

فراهم می‌سازد. در حالت مثلث بندی نیروها در تعدادی کابل متمرکز می‌گردند، در حالی که بدون آن، به کمک پوسته بارها در سطح وسیعی گسترش می‌یابند. سقف پارچه‌ای پس از آنکه تمامی اجزا در محلشان قرار گرفتند، به سازه سوار گردید.

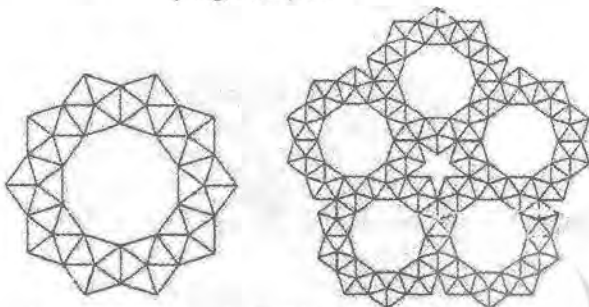
گنبد SunCoast (تصویر ۱۳) که اکنون Thunder Dome نامیده می‌شود در فلوریدا توسط گایگر طراحی و در ۱۹۸۹ تکمیل گردید. شکل آن یا کارکرد اولیه اش که یک استادیوم بیس بال است سازگار می‌باشد. این گنبد ۶۹۰ فوت قطر دارد و بصورت چهار حلقه با زاویه ۶ درجه اجرا شده است. در بالای هر میله تعدادی کابل جدا می‌شوند و تبدیل به کابل‌های قطری می‌گردند و حلقه داخلی بعدی را نگه می‌دارند. ویژگی این سیستم این است که هر حلقه، از حلقه فشاری مرکزی و کابل‌های مرزی بصورت غیرمستقیم آویزان شده است، ضمن اینکه حلقه‌ها به سمت مرکز گنبد سبک تر می‌شوند.

در گنبد جورجیا^{۱۴} در آتلانتا (تصویر ۱۴)، Mathys Levy و همکارانش در شرکت Weidinger به ساختار مثلث بندی فولر بازگشتند. با قطر ۷۸۴ فوت، این گنبد طولانی ترین دهانه برای سازه‌های تنسگریتی است که تاکنون ساخته شده است. در این طرح کابل‌های مرزی بصورت مستقیم از حلقه فشاری پیرامونی به سمت مرکز سازه حرکت نمی‌کنند، بلکه ساختاری لوزی را ایجاد می‌کنند. طراحی مثلث بندی آن به این صورت است که از بالای هر کدام از میله‌ها دو کابل برای نگهداری حلقه داخلی بعدی پایین می‌آید و تشکیل یک مثلث کششی را می‌دهند. از هر گره ۶ کابل خارج می‌گردد. گره‌ها حجیم هستند و در حدود دو تن وزن دارند، از این جهت اقتصادی ترین راه برای ایجاد آنها استفاده از دو صفحه جوش خورده می‌باشد.

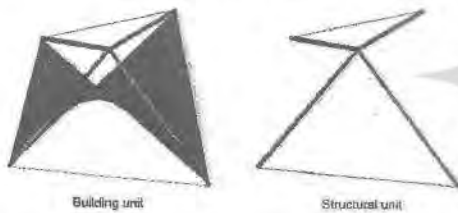
عملکرد این ساختمان، زمین بازی فوتبال است. بنابراین پلان کشیده برای کاربری آن مناسب می‌باشد. پلان بیضوی یا تخم مرغی



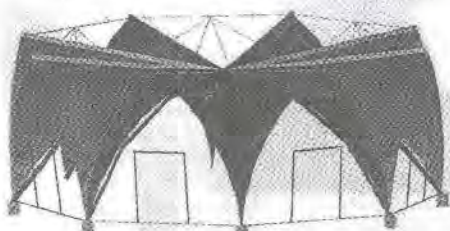
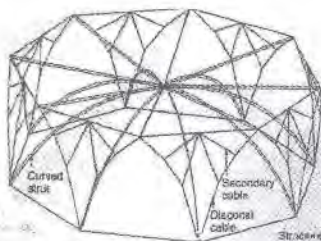
تصویر ۱۷- راهروهای تشکیل یافته از کابل و میله.
ماخذ: (Bing, 2004)



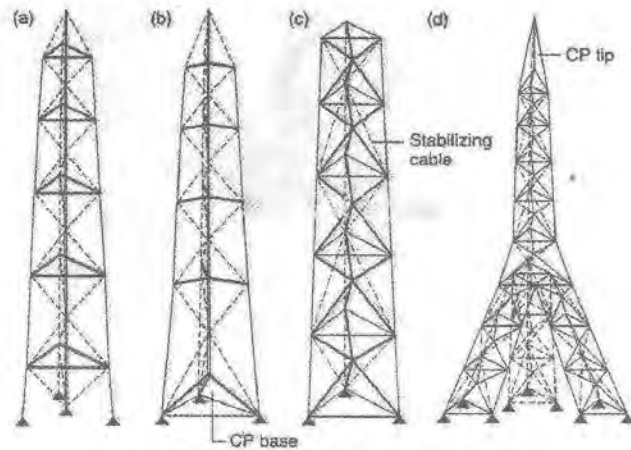
تصویر ۱۸- بازشوهای احاطه شده توسط مدول های چندرخی.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۱۹- سقف غشایی هذلولوی.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۲۰- سقف گلبرگی.
ماخذ: (Bing, 2004)



تصویر ۱۶- دکل های تشکیل یافته از کابل و میله.
ماخذ: (Bing, 2004)

کاربردهای معماری سیستم های تنسگریتی

فرم های سازه ای که در مباحث قبل مورد بررسی قرار گرفتند در عرصه معماری بسیار کاربردی هستند و می توانند بخوبی در یک مسیر سه بعدی برای پاسخگویی به عملکردهای معماری گسترش یابند. به عنوان مثال به کاربرد سازه های تنسگریتی در دیوارهای قائم شیشه ای می توان اشاره داشت (تصویر ۱۵). علاوه بر فرمهای اولیه تنسگریتی، فرم های معماری دیگر ایجاد شده است که در ادامه به آنها اشاره می گردد.

کاربرد عمومی

فرم های تنسگریتی خطی، صفحه ای و فضایی: بلوک های ساختمانی هستند که کارایی سازه ای دارند. فرم های خطی: دو نمونه از کابل های خطی در اینجا نشان داده شده است. یکی برجی شکل است (تصویر ۱۶) و دیگری به شکل پیاده رو می باشد (تصویر ۱۷).

فرم های مسطح: در اشکال با میله های پیوسته (تصویر ۱۸)، بازشوها توسط مدول های دایره ای، مدول های ۵ وجهی یا ترکیب مربع و شش رخی احاطه شده اند. تمام این مدول ها نمونه های میله های ناپیوسته متناظری دارند که در جای خود کاربرد دارند. اشکال فضایی: اشکال مسطح در یک مسیر سه بعدی گسترش یافته و فرم های فضایی ایجاد می نمایند.

کاربرد در طراحی سازه های سقف

سقف غشایی هذلولوی: در اینجا سقف غشایی به چهار لبه هرم اتصال یافته است. هرم با زاوایای چرخشی دیگر نیز در این روش کاربرد دارد (Hanaor, 1998, 1993) (تصویر ۱۹). سقف گلبرگی: این سقف ممکن است برای معماران جدید نباشد. استفاده از سیستم های کابل- میله شانس بیشتری را برای طراحی این سقف ها ایجاد کرده است. میله های مایل پایین و کابل های قطری می توانند از طریق اتصال به لایه بالا انحناء یابند. غشاهای انعطاف پذیر گلبرگی می توانند برای احاطه حجم بکار روند (تصویر ۲۰).

اینکه می‌توانند در ابعاد بسیار کوچکی نگهداری شوند و با حداقل نیروی ماشینی یا دستی سریعاً نیز قابل استفاده و باز شدن هستند (Tibert, 2002, 26).

موردی که می‌بایستی در طراحی این سازه‌ها مورد توجه قرار گیرد، اتصالات اعضا به یکدیگر می‌باشد. طراحی اتصالات عملکرد سازه‌های، زیبایی سازه و ... را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در انتخاب اتصالات مسائلی چون قیمت ساخت و سوار و سرهم کردن اجزا حایز اهمیت است، اجرای آنها می‌بایستی راحت باشد، سریع اجرا گردند، ساده و سبک باشند و در ضمن می‌بایستی پاسخگوی نیازها باشند. یکی از مشکلاتی که در نمونه‌های اولیه مشهود بود این است که هیچ مکانیسمی جهت جلوگیری از بی‌نظمی اعضا پیچیده و قتیکه سازه بسته شده و اعضا شل می‌شوند، وجود نداشت. Liapi برای رفع این مشکل سوار کردن واحدهای تنسگریتی در سایت را پیشنهاد داد.

روش‌های گسترش

استفاده از میله‌های تلسکوپی^{۱۸}: عمل ازدیاد طول در این حالت به کمک فشار صورت می‌گیرد. در این حالت نیاز به یک منبع انرژی خارجی است (تصویر C-22).

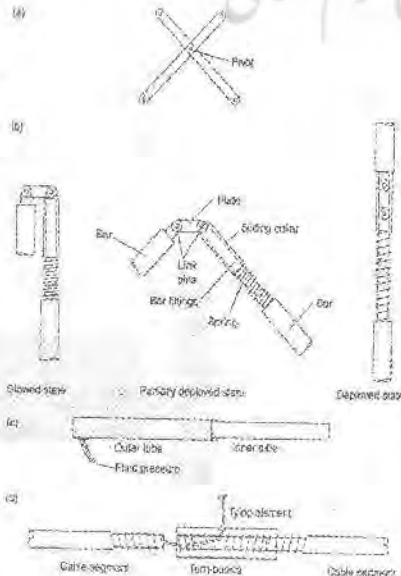
روش پیچاندن: در این حالت عمل گسترش فارغ از نیاز به عرضه انرژی می‌باشد و معمولاً برای تغییر طول‌های کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. به هر حال می‌توان جهت ازدیاد طول از طریق اتصال یک لولا (Pin) برای قفل کردن دو قسمت یک میله استفاده کرد قبل از آنکه به کمک پیچ ثابت گردند (تصویر a-22).

استفاده از میله‌های Energy-Loaded: در زمانی که انرژی آزاد می‌گردد میله‌ها باز می‌شوند و وقتی که انرژی ذخیره می‌گردد، حجم بسته می‌گردد (تصویر b-22) مکانیسم گسترش در این حالت به این ترتیب است که پس از باز شدن اعضا لولایی که دو تا میله را به هم وصل می‌کنند، قفل می‌گردند و سپس هر دو به عنوان یک قطعه پیوسته عمل می‌کنند (Furuya, 1992, 37).

استفاده از کابل‌های آزاد شونده^{۱۹}: در این حالت کابل‌ها بصورت منفرد یا جمعی به کمک

اتصالات گسترش می‌یابند. بطور مرسوم گسترش کابل‌ها از طریق یک قرقره اتفاق می‌افتد.

محققین در پی آنند که این سازه‌ها را در اثر پیشرفت‌هایی که در عرصه تکنولوژی رخ می‌دهد، توسعه دهند، بطوریکه قادر باشند بطور اتوماتیک گسترش یافته و تنظیم گردند.



تصویر ۲۲- روش‌های گسترش. ماخذ: (Tibert, 2002)

کاربرد ساختارهای تنسگریتی با الحاقات تزئینی

سازه‌های تنسگریتی به عنوان اعضا تزئینی می‌توانند به معماری اضافه گردند. این الحاقات می‌توانند پانل‌هایی با اشکال ویژه باشند بدون آنکه بر عملکرد سازه تأثیر داشته باشند.

پانل‌های تزئینی اضافه شده به مدول‌ها: در این ایده پانل‌های تزئینی به مدول‌های کابل و میله جهت زیبایی اتصال یافته‌اند. خانواده مدول‌های ستاره‌ای شکل: مدول‌های کابل و میله می‌توانند در اشکال ستاره‌ای نظم یابند.

سازه‌های بازوبسته شونده^{۱۷}

یکی از مهمترین مباحثی که محققین به آن پرداخته‌اند، قابلیت گسترش در سیستم‌های تنسگریتی می‌باشد. در پی تصمیم دولت ایالت متحده آمریکا در سال‌های ۱۹۸۰ برای تاسیس یک پایگاه فضایی، ناسا هزینه تحقیق در خصوص سازه‌های باز و بسته شونده را فراهم کرد. هدف از این تحقیق ساخت سیستم‌های مهندسی باز و بسته شونده‌ای بود که بتواند جهت حمل به فضا در فضاییما جای گیرد. این سازه‌ها می‌بایست پس از حمل به فضا گسترش یافته و به اصطلاح منبسط شوند. حجم بسته‌بندی کم، سرهم بندی سریع و گسترش و بسته شدن آسان از معیارهای طراحی این سازه‌ها بود (Furuya, 1992, 12).

در فاصله زمانی بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ نه مرتبه مسابقات تنیس ویمبلدون در شرایط آب و هوای بارانی برگزار گردید، به دلیل نیاز چمن زمین به نور خورشید و لزوم سرباز بودن زمین، یافتن راهی برای سرپوشیده نمودن مرکز زمین در زمان‌های مقتضی ضرورت یافت. برای غلبه بر چنین مشکلاتی ساخت استادیوم‌ها و استخرها یا سقف متحرک رواج یافت.

اجزا سازه‌های باز و بسته شونده عبارت از عناصر ثابتی بصورت کابل یا میله که طول آنها در فرآیند باز و بسته شونده ثابت است، کابل‌های شل شونده و عناصر باز و بسته شونده می‌باشند (Tibert, 2002, 25).

این سازه‌ها هنگامیکه به عنوان نگهدارنده مورد استفاده قرار می‌گیرند، حداکثر حجمشان را دارند، در حالیکه هنگام حمل و نقل بصورت کاملاً فشرده قرار گرفته و کمترین حجم را دارند (تصویر



تصویر ۲۱- سازه باز و بسته شونده. ماخذ: (Tibert, 2002)

۲۱). انعطاف پذیری سیستم در حالت بازوبسته شدن و پایداری آن در حالت گسترش یافته بسیار حائز اهمیت است.

بازوبسته شونده می‌تواند از طریق یک انرژی خارجی از قبیل الکتریسیته، نیروی دستی یا انرژی داخلی ذخیره شده در اجزا اتفاق بیفتد. مهم‌ترین ویژگی این سازه‌ها قابلیت استفاده مجددشان می‌باشد و

نتیجه

را از جهات مختلف مورد آزمایش و بررسی قرار داده اند؛ این مفهوم هنوز هم تحت عنوان نوآوری شناخته می شود. دلیل این ادعا تعداد کم کارهای ساخته شده در این سیستم می باشد.

متاسفانه معماران یا با این مفهوم آشنایی ندارند و یا در حد عنوان با آن آشنایی دارند. در مهندسی سازه نیز اگرچه که پژوهش های زیادی در ارتباط با تحلیل این نوع سازه صورت گرفته، اما این پژوهش ها تنها در حد مباحث تئوری باقی مانده و در عمل بکار گرفته نشده اند. همکاری معماران و مهندسی می تواند به تحقق عملی این پژوهش ها منجر گردد.

در این مقاله سعی بر آن بود تا توجه به در اختیار بودن منابع جامع فارسی، آشنایی اولیه با این سیستم، ویژگی ها و کاربرد آن در معماری صورت پذیرد تا این آشنایی رهگشای پژوهش های دیگر و همکاری مهندسی و معماران در جهت استفاده بهینه از قابلیت های آن باشد.

سازه های تنسگریتی با داشتن قابلیت هایی چون امکان باز و بسته شدن، سبکی، استفاده حداقل از مصالح و زیبایی در معماری و طراحی صنعتی می توانند بکار گرفته شده و کارگشا باشند، خصوصا "خاصیت باز و بسته شونده" این سازه ها ویژگی درخور توجهی را ایجاد نموده است. سازه های باز و بسته شونده می توانند بطور وسیعی در سقف های موقت، سقف بازارچه ها، سقف اتیارهای موقت، استادیوم ها، استخرها، پارکینگ ها و گلخانه ها مورد استفاده قرار گیرند، در ارتش در ساخت بیمارستان های موقت و اردوگاه ها کاربرد دارند، با گسترش علم نجوم آنتن های فضایی باز بسته شونده بکار گرفته می شوند. همچنین در ساخت تجهیزاتی که همراه فضانوردان به فضا ارسال می گردند و در طراحی المان های شهری کاربرد دارد.

با وجود داشتن چنین قابلیت های درخور توجه و با وجود آنکه مفهوم تنسگریتی بیش از ۵۰ سال قدمت دارد و بزرگان معماری و مهندسی آن

پی نوشت ها:

- | | |
|--|--|
| ۱۲ Geiger. | ۱ Space Structures. |
| ۱۲ از این جهت ناخالص نامیده می شود که در آنها میله ها مستقل بوده و اتصال دارند. | ۲ سازه تنسگریتی در فارسی به سازه کش بستی ترجمه شده است. |
| ۱۴ Montpellier. | ۳ Self-Stress. |
| ۱۵ در اینجا مثلث بندی به این معنی است که دو انتهای هر میله با قرار گرفتن در رأس یک مثلث بصورت کامل در جایشان محکم شده اند. | ۴ Kenneth Snelson. |
| ۱۶ Georgia Dome. | ۵ Buckminster Fuller. |
| ۱۷ Deployable Structure. | ۶ Emmerikh. |
| ۱۸ Telescopic Strut. | ۷ Tensegrity Simplexes. |
| ۱۹ Releasing Cable. | ۸ Tensegrity Prisms. |
| | ۹ Rene Motro. |
| | ۱۰ http://www.surrey.ac.uk/eng/research/ems/ssrc/formian.htm |
| | ۱۱ Wacław Zalewski. |

فهرست منابع:

- Binbing, W.(2004) , *Free Standing Tension Structures*, Spon Press, London.
- Brooks, W.(2002), *Kinematic Analysis of Tensegrity Structures*, M.S. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Charalambides, J.(2004), *Computer Method for The Generation of The Geometry of Tensegrity Structures*, PhD Thesis, The University of Texas, Austin.
- Domer, B. and Smith, I.(2002), An active structure that learns, *Journal of Computing and Civil Engineering*, Pittsburgh.
- Furuya, H.(1992), Concept of Deployable Tensegrity Structures in Space Applications, *Journal of Space Structures*, vol.7, no 2, 143-151.
- Hernandez Juan, S. - Mirats Tur, J.M. (2008), *Tensegrity Frameworks: Static Analysis Review*, Mechanism and Machine Theory, Barcelona, Spain.
- Marshall, M.(2003), *Analysis of Tensegrity-Based Parallel Platform Devices*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
- McGinley, P.(2002), *Design of Large Space Structures Derived From Line Geometry Principles*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
- Nooshin, H., Disney, P., (1991), Elements of Formian. *Computers and Structures*, vol.41, no. 6, 1183-1215.
- Paul, C., Lipson, H., Cuevas, F.(2005), Evolutionary Form Finding of Tensegrity Structures, Mechanical and Aerospace Engineering Cornell University, New York.
- Robin, T.(1996), *Engineering A New Architecture*, Quebecor-Eusey Press, Massachussets.
- Tibert, G.(2002), *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*, PhD Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm.
- Tran, T. M.(2002), *Reverse Displacement Analysis for Tensegrity Structures*, M.S. Thesis, University of Florida, Florida.
- Sultan, C.- Skelton, R. (2004), A Force and Torque Tensegrity Sensor, *Sensors and Actuators*, Vol.112, no. 2-3, 220-231.